

PEDOT:PSS在有机太阳能电池中的应用研究进展

许文博, 宋世伟, 王承

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2023年11月29日; 录用日期: 2024年1月31日; 发布日期: 2024年2月7日

摘要

聚(3,4-乙撑二氧噻吩):聚苯乙烯磺酸盐(PEDOT:PSS)具有良好的导电性和柔性, 在可穿戴的柔性电致变色器件和柔性太阳能电池中显示出巨大的潜力。通过不同的化学沉积和物理掺杂可以更大的提高PEDOT:PSS的电化学性能。目前PEDOT:PSS在有机太阳能电池(Organic solar cells, OSCs)空穴传输层(HTL)的应用研究极为广泛, 但是其具有低电导率、水/氧敏感、腐蚀电极等缺陷。为了追求优异的性能, 常用的PEDOT:PSS空穴传输层仍需优化。本文综述了近年来PEDOT:PSS的各种改善方法和在有机太阳能电池空穴传输层中的应用研究最新进展, 并介绍了PEDOT:PSS在柔性有机太阳能电池的应用。

关键词

有机太阳能电池, PEDOT:PSS, 空穴传输层, 能量转换效率

Research Progress of PEDOT:PSS Application in Organic Solar Cells

Wenbo Xu, Shiwei Song, Cheng Wang

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Nov. 29th, 2023; accepted: Jan. 31st, 2024; published: Feb. 7th, 2024

Abstract

Poly (3,4-ethylenedioxythiophene): Polystyrene sulfonate (PEDOT:PSS) has good electrical conductivity and flexibility, and shows great potential in wearable flexible electrochromic devices and flexible solar cells. The electrochemical properties of PEDOT:PSS can be greatly improved by different chemical deposition and physical doping. At present, PEDOT:PSS has been widely applied in

the hole transport layer (HTL) of organic solar cells, but it has some defects such as low conductivity, water/oxygen sensitivity, corrosion electrode and so on. In order to pursue excellent performance, the commonly used PEDOT:PSS hole transport layer still needs to be optimized. In this paper, the application of PEDOT:PSS in organic solar cells is reviewed, and the different deposition methods of PEDOT:PSS and the method and mechanism of improving the performance of organic solar cells by composite films are introduced.

Keywords

Organic Solar Cells, PEDOT:PSS, Hole Transport Layer, Power Conversion Efficiency

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着绿色能源产业的爆炸式发展，太阳能市场引起广泛关注，基于太阳能的光电子器件取得了巨大进展[1] [2] [3] [4] [5]。有机太阳能电池(Organic solar cells, OSCs)在能量转换领域和其他潜在的能源管理设备中是一种很有前途的候选者。它具有质量轻、可印刷生产且成本较低、并可制成柔性电池器件等优点吸引了广大学者的兴趣[6] [7] [8] [9]。1958年，Kearns 和 Calvin 将有机染料夹在两个电极之间制备成功首个 OSCs 器件[10]。如今有机太阳能电池的功率转换效率(PCE)已提升从 1%提高至 19% [11] [12]。Yuan 等人[13]报道了以 PM6 为供体、以窄带隙小分子 Y6 为受体的二元 OSCs,其功率转换效率为 15.7%。Xiong 等人[14]合成了新的供体生产的 OSCs 功率转换效率超过 16%，取得了极大的进展。

有机太阳能电池性能参数主要有能量转换效率(PCE)、填充因子(FF)、开路电压(V_{oc})、短路电流密度(J_{sc})。OSCs 的结构主要由氧化铟锡(ITO)阳极、空穴传输层(HTL)、活性层、电子传输层、电极等构成见图 1(a)。空穴传输层的作用是帮助电荷在太阳能的传输与收集、减小界面壁垒等，是太阳电池稳定性和光伏转换效率的重要影响因素之一[15] [16]。目前，常用的空穴传输层材料主要包括有机材料(氧化石墨烯)、无机材料(过渡金属氧化物)和有机无机杂化材料[17] [18]。为了实现更高的 OSCs 功率转换效率，除了合成新材料外，还需要更多的研究来发现空穴/电子传输层。到目前为止，聚(3,4-乙烯二氧噻吩):聚苯乙烯磺酸盐(PEDOT:PSS)由于其能级合适、机械柔性高和可见光区域足够的光学透明度，已成为 OSCs 中最受欢迎的 HTL 材料[19]。其分子结构见图 1(b)所示。

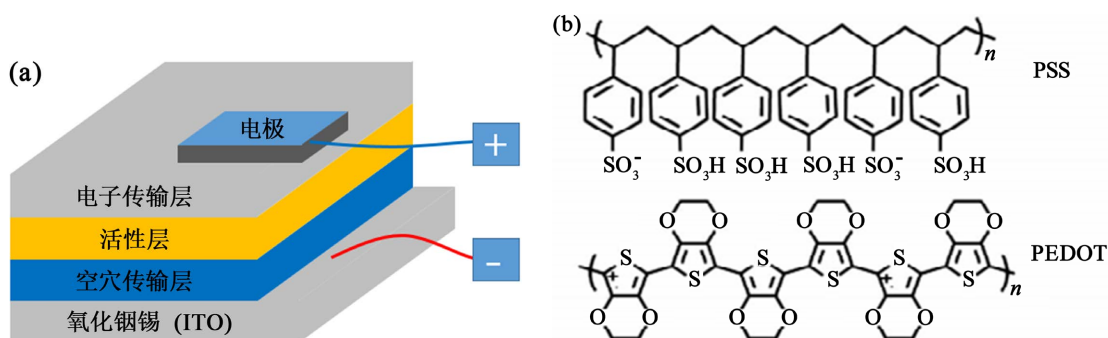


Figure 1. (a) Schematic of traditional structure OSCs; (b) Molecule structures of PEDOT:PSS [19]

图 1. (a) 传统结构 OSCs 示意图; (b) PEDOT:PSS 的分子结构[19]

PEDOT 是一种不溶于水的导电聚合物, 需要掺杂聚(苯乙烯磺酸盐)阴离子(PSS⁻), 然后它可以很好地分散在水溶液中, 形成稳定的 PEDOT:PSS 悬浮液。但是 PEDOT:PSS 的链状结构在悬浮液中处于相互缠绕的无序结构, 这会导致其在化学反应过程中的可控性低, 从而降低其电化学性能[20]。所以, 与其他空穴传输材料相比, PEDOT:PSS 存在电导率较低的问题。

此外, 由于 PSS 的吸湿性和酸性, PEDOT:PSS 作为空穴传输层可以降解有机层从而缩短器件寿命[21][22]。针对上述 PEDOT:PSS 存在的问题。本文综述了近年来 PEDOT:PSS 的各种改善方法和在有机太阳能电池空穴传输层中的应用研究最新进展, 并介绍了 PEDOT:PSS 在柔性有机太阳能电池的应用。

2. PEDOT:PSS 的改性或掺杂处理

PEDOT:PSS 具有易成膜性且透明性高的特点, 一般用作有机太阳能电池的空穴传输层, 具有高电导率、低带隙等优点, 但其酸性和腐蚀性会降低 OSCs 的使用寿命。此外 PEDOT:PSS 的电导率低于金属, 电荷载流子存储过程中的能量损失较大从而导致 OSCs 的功能转换效率降低。因此对 PEDOT:PSS 的进行优化处理从而提升其电导率和降低其腐蚀性是非常重要的。

2.1. PEDOT:PSS 的酸处理

PEDOT:PSS 的酸处理是通过酸性溶液中的阳离子(H⁺)和阴离子(PSS⁻)相结合, 从而使 PEDOT 和 PSS 在溶液中相分离以提高 PEDOT:PSS 的导电性。Mengistie 等人[23]用甲酸处理 PEDOT:PSS 膜, 削弱了 PEDOT 与 PSS 之间的库伦力, 使得 PEDOT 链构象发生改变, 将 PEDOT:PSS 膜的电导率提高了 4 个数量级, 达到 2050 S/cm, 将该膜用作基于 P3HT:PCBM 的 OSCs 的空穴传输层, 其 PCE 达到 4.10%。酸处理后 PEDOT:PSS 形态结构变化示意图见图 2。Fan 等人[24]选用几种不同酸(HCl、H₂SO₄、CH₃SO₃、H₃PO₄、H₂C₂O₄)来掺杂 PEDOT:PSS, 发现 CH₃SO₃ 处理的 PEDOT:PSS 电导率最高为 3470 S/cm, 研究还发现, 在高温条件下 H⁺与 PSS⁻会结合形成 PSSH, 从而导致 PEDOT 与 PSS 相分离, 进而提高了 PEDOT:PSS 的电导率。

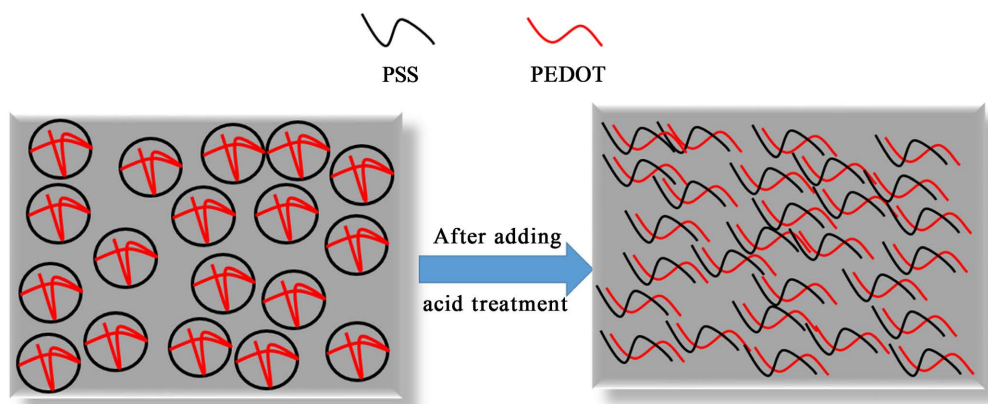


Figure 2. Schematic diagram of morphological and compositional changes of PEDOT:PSS films after adding acid treatment [25]
图 2. 加酸处理后 PEDOT:PSS 膜形态及成分变化示意图[25]

使用弱酸性物质对 PEDOT:PSS 进行掺杂处理是减弱其对电极的腐蚀是提成 OSCs 的性能并延长使用寿命的一种方法。用酸性较弱的 POM 对 PEDOT:PSS 进行优化, 使基于 PBDB-TF:BTP-eC9 二元 OSCs 能获得 17.62% 的 PCE [26]。Cao 等人[27]使用磺化丙酮甲醛木质素(GSL)见图 3(a)与 PEDOT:PSS 进行掺杂反应并应用到基于 PTB7-Th:PC₇₁BM 见图 3(b)为活性层的有机太阳能电池中。由于 GLS 与 PEDOT:PSS 发生反应形成稳定的弱酸性化学结构, 加快了空穴传输到阳极的速度, 使得制作的 OSCs 的 PCE 提升到

了 8.47%，相较于使用 PEDOT:PSS 的原始有机太阳能电池的 PCE 提升了 10%。同时新生成的 PEDOT:GSL 酸性更弱，降低了空穴传输层对对保护活性层的腐蚀，极大地提升了器件稳定性和使用寿命，为 PEDOT:PSS 做空穴传输层的优化提供了全新的思路。

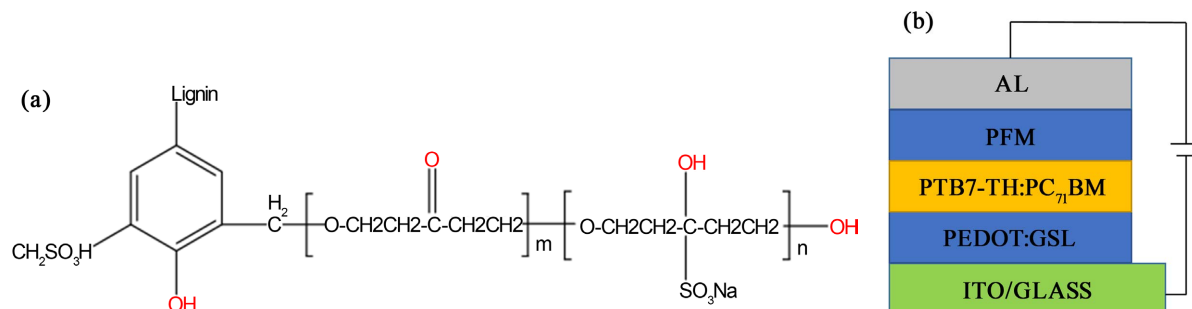


Figure 3. (a) GSL chemical structure diagram; (b) Schematic diagram of OSCs after GSL replacement [27]

图 3. (a) GSL 化学结构图; (b) 添加 GSL 后修饰的 OSCs 示意图[27]

Yagci 等人[28]制备了不同浓度 0~5 mg/ml 硼酸(H_3BO_3)掺杂的 PEDOT:PSS 薄膜作为空穴传输层。采用旋涂技术制备了未掺杂和硼酸掺杂的 PEDOT:PSS 薄膜，并通过 XRD、UV、AFM、FTIR 和电导率测量对其进行了表征。制备了 ITO/PEDOT:PSS: H_3BO_3 /P3HT:PCBM/Al 形式的 OSCs。在 PEDOT:PSS 中 H_3BO_3 浓度为 1.25 mg/ml 的电池显示出更高的性能，导致在 AM1.5G 照明下的 PCE 为 2.14%。Xiao 等人[29]使用由吡啶基四硫富瓦烯衍生物(TTF-py)与 PEDOT:PSS 合成的双层 HTL 在基于 PTB7-Th:PC₇₁BM 的 OSCs 中实现了 9.37% 的 PCE，同时双层 HTL 的结构有效的削弱了空穴传输层对保护活性层的腐蚀性，保护了因 ITO 腐蚀造成的 OSCs 的性能衰减，极大地提升了器件的稳定性。同时 TTF-py 改性后的 HTL 有助于减少能量损失，增强了 HTL 与活性层的界面接触，从而整体提升了器件的 PCE。

2.2. PEDOT:PSS 的有机溶剂处理

利用有机溶剂改变 PEDOT 与 PSS 的比例，也是提高 PEDOT:PSS 电导率的常用方法。常见的有机溶剂主要包括二甲基亚砜(DMSO)、四氢呋喃、乙二醇、N,N-二甲基甲酰胺、山梨醇、甘油、甲氧基乙醇、2-丙醇等[30]-[40]。Yaily 等人[41]基于易加工的石墨烯衍生物和 PH1000 (导电 PEDOT:PSS 聚合物)。将合成的石墨烯衍生物在水悬浮液中进行处理并滴涂在普通玻璃基板上，另将二甲基亚砜(DMSO)改性的 PH1000 旋涂到 SPG 层上。制造基于双层替代电极用于非富勒烯 PBDB-T:ITIC 活性层的有机太阳能电池(OSCs)。控制器件(使用 ITO 作为阳极)的平均功率转换效率(PCE)为 4.0% (最佳 4.2%)，而具有替代 SPG/PH1000 双层阳极的器件的平均功率转化效率(PCE)为 8.3% (最佳 8.6%)。Jang 等人[42]通过用醇基溶剂 2-氯乙醇(2-CE)后处理来提高 PEDOT:PSS 薄膜的电导率，在基于 PTB7-Th:PC₇₁BM 的 OSCs 中用作透明阳极时，2-CE 处理的 PEDOT:PSS 膜的性能为(PCE = 9.04%)，比添加 DMSO 的膜(PCE = 7.63%)具有更好的性能。2015 年，Saghaei 等人[43]使用苯酚掺杂 PEDOT:PSS，PEDOT:PSS 薄膜经苯酚蒸汽处理后的电导率提高到 1193 S/cm，经苯酚液滴处理后的电导率提高到 1054 S/cm。经过苯酚处理后，PEDOT 片段在整个膜中的重排以及由此引起的构象变化是导电性增强的主要原因。将改性的 PEDOT:PSS 膜用作无 ITO 有机太阳能电池(OSCs)的电极。以苯酚处理的 PEDOT:PSS 薄膜为阳极，使基于 P3HT:PCBM 为活性层的 OSCs 的 PCE 为 3.29%。Zhang 等人[44]用甲醇处理后的 PEDOT:PSS 电导率从 5.51×10^{-4} S/cm 升到了 4.04×10^{-2} S/cm，显著提升了近两个数量级。这主要是因为使用甲醇处理后，绝缘的 PSS 被冲刷，PEDOT 的空穴传输能力得到了更好的发挥，将其作为 HTL 使用于 PTB7-Th:PC₇₁BM 体系时，PCE 从 8.4% 提升

至 9.4%。Zhang 等人[45]使用黑磷量子点(BPQDs)修饰 PEDOT:PSS 作为空穴传输层。BPQDs 具有高的空穴传输率和带隙可调性可以满足 OSCs 中对能级可调的需求。BPQDs 在器件内部与 PEDOT:PSS 的结合优化了 ITO 阳极和聚合物供体之间的级联能带结构,促进了空穴提取与传输。在基于 PTB7-Th:PC₇₁BM 的体系中,使得器件的 PCE 从 8.12%增加到 9.11%。在活性层为 PM6:IT-4F 的非富勒烯体系中,制作器件结构为 ITO/PEDOT:PSS-BPQDs/活性层/PFN/Al。其 OSCs 的 PCE 从 11.65%提高到 12.81%。Xie 等人[46]提出了一种简单且经济高效的方法,通过掺杂乙氧基化聚乙烯亚胺(PEIE),将 PEDOT:PSS 的功函数从 5.1 eV 可控地调节到 3.95 eV。PEIE 掺杂的 PEDOT:PSS 薄膜可以在有机太阳能电池中用作阴极界面层,并研究了 PEIE 掺杂的 PEDOT:PSS 薄膜的光电特性、表面形貌和电子传输能力,基于掺杂 5wt% PEIE 的 PEDOT:PSS 膜制作的 ITO/PEIE:PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/MoO₃/Al 器件表现出与传统 ZnO 基器件相当的性能($J_{SC} = 10.043 \text{ mA/cm}^2$, $V_{OC} = 0.612 \text{ V}$, $FF = 0.507$, $PCE = 3.121\%$)。部分使用酸和有机物处理 PEDOT:PSS 后的 OSCs 的光电转换效率见表 1。

Table 1. PCE of OSCs after PEDOT:PSS modified by different acids and organics
表 1. 不同酸和有机物修饰 PEDOT:PSS 后 OSCs 的 PCE

Modification	Active layer	ETL	V_{OC}/V	$J_{SC} (\text{mA/cm}^2)$	FF	PCE/%	提升原理
H ₃ BO ₃	P3HT:PCBM	Al	0.62	7.57	0.46	2.14 [28]	能级微调
DMSO/GO	PBIB-T:ITIC	PFA	0.743	16.7	0.56	8.6 [41]	电导率增加
苯酚	P3HT:PCBM	Ca/Al	0.568	9.181	0.63	3.29 [43]	电导率增加
甲醇	PTB7-Th:PC ₇₁ BM	Al	0.68	10.26	0.64	9.4 [44]	能级微调
BPQD	PTB7-Th:PC ₇₁ BM	Al	0.57	12.36	0.58	12.81 [45]	能级微调
PEIE	P3HT:PCBM	Al	0.612	10.43	0.507	3.12 [46]	能级微调

使用酸或有机物改善 OSCs 的性能的原理主要为能级微调和提升电导率,在掺杂 DMSO/GO 的 OSCs 的 PEDOT:PSS 作为空穴传输层的 OSCs 对于改善短路电流密度、开路电压效果最佳。使用甲醇修饰过的 PEDOT:PS 做空穴传输层的 OSCs 的填充因子效果最佳。使用 BPQD 修饰过的 PEDOT:PS 做空穴传输层的 OSCs 的功率转换效率效果最佳。但使用酸或有机物修饰 PEDOT:PSS 会增加空穴传输层酸性和对电极腐蚀性会降低 OSCs 的使用寿命。

2.3. PEDOT:PSS 的纳米材料掺杂处理

由于部分纳米材料具有良好的导电性,使用纳米材料和 PEDOT:PSS 进行掺杂处理有利于增加 PEDOT:PSS 的电荷转移效率,从而明显的提高电导率,使得那纳米材料/PEDOT:PSS 在空穴传输层的电荷转移能力增强。Li 等人[47]将石墨烯掺杂入 PEDOT:PSS 使用传统的旋涂方法制备了 PEDOT/PSS/GQDs 复合薄膜,通过 GQD 的调控 PEDOT:PSS 的苯-醌结构转变。使优化后的 PEDOT:PSS/GQDs 复合膜作为空穴传输层的 OSCs 的 PCE 提升到 16.15%。比 PEDOT:PSS 膜上制备的钙钛矿太阳能电池的平均功率转换效率提高了 35%。Tien Nguyen 等[48]人在以 PEDOT:PSS 做的 HTL 中引入具有可控电导率和带边的碳量子点(CQD)来提高 PEDOT:PSS 的电导率。通过 PEDOT 链和 CQD 之间通过 π - π 相互作用,以及提高了光活性层和顶部阳极之间接触界面的兼容性。优化了 PEDOT:PSS 中 CQD 的掺入比例(PH-G 0.05),以 PM6:BTP-eC9、PSeHD:Y6 为活性层的 OSCs 的 HTL。使用足量的基于 CQDs 的 HTL 改性的 PH 的 OSCs 在 VOC 和 JSC 方面都表现出显著的增强,导致 PCE 高达 3.90%。Wang 等人[49]将二氧化钛(TiO₂)掺杂

到基于 PEDOT:PSS 的空穴传输层中,优化了 HTL 和电极活性之间的接触并促进了活性层对光子的捕获,建立了良好的空穴传输通道。加快了 PBDB-T 向活性层的迁移速率,使得 PBDB-T 和 N2200 之间更容易垂直分离,进而提高了 OSCs 的 PCE 和稳定性。使得在 PEDOT:PSS 夹层中掺杂 2% TiO_2 的器件的 PCE 为 8.9%。Wang 等人[50]通过一种简单且具有成本效益的液相剥离(LPE)方法开发了掺杂到 PEDOT:PSS 中的 WS_2 纳米片(WS_2NS) (PEDOT:PSS/ $\text{WS}_2\text{-NS}$)作为有机太阳能电池(OSCs)的有效空穴传输层(HTL)。由于 PEDOT:PSS/ $\text{WS}_2\text{-NS}$ 阳极夹层具有较高的功函数。降低了 HTL 粗糙度,提高了空穴迁移率,使得基于 PM6:Y6 的 OSCs 的 PCE 从 14.35%提高到 15.67%。

Hou 等人[51]通过将 WO_x 纳米颗粒对 PEDOT:PSS 进行掺杂处理,改善了空穴传输层的表面自由能以及 HTL 和活性层的形态,更有利于载流子迁移率的平衡。使得基于 PM6:IT-4F 体系的 OSCs 获得了 14.57%的 PCE 和超过 80%的填充因子,这也是该体系该论文发表之前达到最高的填充因子之一。Kim 等人[52]研究了金纳米粒子嵌入 PEDOT:PSS 作为有机太阳能电池(OSCs)空穴传输层(HTL)的退火效应。退火温度(110°C、130°C 和 150°C)影响器件的表面形貌和电学性能。OSCs 的最终器件结构由 ITO 涂层玻璃/PEDOT:PSS + Au/NPs/P3HT:PCBM/Al 阴极组成。得出 HTL 在 110°C 退火的 OSC 获得了最佳的电学性能、表明并联电阻(5.84 Ω)、串联电阻(152.5 Ω)和 PCE 值(2.8%)。Nazim 等人[53]合成了一种新的具有咪唑间隔物的噻唑并[5,4-d]噻唑核有机发色团(TP-FTzF-TP),并用石墨烯(Gr)修饰了 PEDOT:PSS 缓冲层,用于高效溶液处理体异质结(BHJ)小分子 OSCs。在基于噻唑并[5,4-d]噻唑核的有机发色团中引入咪唑作为间隔物调节了吸收和电化学性质。合成的 TP-FTzF-TP 发色团表现出良好的光学参数和-5.33 eV/-3.15 eV 的 HOMO/LUMO 值。Gr 对 PEDOT:PSS 的改性显著提高了薄膜的粗糙度。采用 ITO/Gr:PEDOT:PSS/TP-FTzF-TP:PC₆₀BM/Au 结构制造的 SMO SC 器件实现了 PCE 为 3.63%。部分使用纳米颗粒处理 PEDOT:PSS 后的 OSCs 的光电转换效率见表 2。

Table 2. PCE of OSCs after PEDOT:PSS modified by different nanomaterials

表 2. 不同纳米材料修饰 PEDOT:PSS 后的 OSCs 的 PCE

Modification	Active layer	ETL	V_{oc}/V	J_{sc} (mA/cm ²)	FF	PCE/%	提升原理
GQD	P3HT:PCBM	Al	1.002	21.41	0.753	16.15 [47]	电导率增加
CQD	PSeHD:Y6	ZnO	0.61	9.49	0.537	3.11 [48]	电导率增加
TiO ₂	P3HT:PCBM	Ca	0.87	13.74	0.725	8.9 [49]	电荷转移增强
WS ₂	PM6:Y6	Al	0.834	25.55	0.735	15.67 [50]	电荷转移增强
Au	P3HT:PCBM	Al	0.586	7.3	0.605	2.8 [52]	改善形貌
Gr	TP-FTzF-TP	Au	0.64	10.56	0.53	3.63 [53]	改善形貌

使用纳米材料改善 OSCs 的性能的原理主要为改善形貌、增强电荷转移、提升电导率,在基于掺杂 GDQ 的 PEDOT:PSS 作为空穴传输层的 OSCs 其对于改善短路电流密度、开路电压、填充因子、功率转换效率效果最佳。纳米材料修饰的 PEDOT:PSS 作为空穴传输材料的显著优点是功函数合适、光透过率高、稳定性好、PCE 高,但存在的明显缺陷是加工成本高,不宜进行大规模生产,还需要对其加工方式进行更深入的研究。

2.4. 其他处理方法

除了上述处理方法,其他提高 PEDOT:PSS 电导率的方法主要有使用有机离子液体、盐、盐、稀土元素、表面活性剂和导电聚合物等处理方法。Li 等人[54]基于 PM6:Y6:PC₇₁BM 的 PEDOT:PSS 后处理进行了

全面的研究。通过水洗的方法对 PEDOT:PSS 进行改性处理, 减少 HTL 表面缺陷以提高导电性。通过这种方法, 使得基于 PTB7-Th:PC₇₁BM 为活性层的有机太阳能电池中 OSCs 的 PCE 从 15.9% 提高到 16.7%。Tien Nguyen 等人[55]使用各种溶剂和表面活性剂(GO)成功地调节了 PEDOT:PSS 溶液的亲水性。将氧化石墨烯(GO)胶体悬浮液在 PEDOT:PSS 内的分散, 通过 GO 改变 PEDOT 链的构象, 提高了 PEDOT:PSS 的点传输速率, 进一步提升了导电率。使得基于 m-PEDOT:PSS(PH5)结构的用 PH5-GO1 制备的 iOPV 的 PCE 高达 4.13%。Mohammad 等人[56]在 PEDOT:PSS 喷射沉积的过程中掺杂 Eu³⁺以产生阳极缓冲层(ABL), 对 PEDOT:PSS 进行改性处理后产生的 ABL 表面更光滑, 粗糙度更低。在用作 ABL 的基于 PTB7:PC₇₁BM 的有机太阳能电池(ITO/ABL/PTB7:PC₇₁BM/AI)中, 提高了所提出器件的电流密度, 使得 OSCs 的 PCE 从 2.53% 增加到 2.79%, 并且通过在 ABL 的喷射沉积过程中施加电场, PCE 进一步增加到 3.97%。Li 等人[57]使用非离子表面活性剂(聚乙二醇 2,5,8,11-四甲基-6-十二碳炔-5,8-二醇醚, PEG-TmDD), 它通过改善 PEDOT:PSS 水溶液在有机光活性层上的润湿性能进而提高电导率, 这可能归因于在酸性条件下的热退火过程中 PEG-TmDD 分解为 EG 和 TmDD。生成的 EG 诱导 PEDOT 和 PSS 链的分离和聚集, 使基于 P3HT:ICBA 为活性层的 OSCs 的 PCE 达到 4.1%。Jdigoras 等人[58]通过印刷的方式将 PEDOT:PSS 印刷在蜂窝状银网络上用于染料敏化太阳能电池的阴极, 一方面蜂窝状银网络可以降低与导电涂层之间的电阻, 另一方面 PEDOT 层可以产生高的表面积用于有效的电催化, 增加了导电性。与传统的铂电极相比, 其转换效率相当, 且所采用的方法简便无毒, 成本更低, 同时在柔性方面也取得了不错的效果。Thokchom 等人[59]用 Silvaco TCAD Atlas 工具对含有 PEDOT:PSS 和石墨烯层的太阳能电池的优化设计和模拟进行了计算研究。以聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)被用作柔性基底, 石墨烯被用作具有石墨烯/PEDOT:PSS/PE 结构的器件的阴极。PEDOT:PSS 层的厚度在 50 至 90 nm 之间变化。结果表明 PEDOT:PSS 厚度为 70 nm 的太阳能电池的性能优于其他太阳能电池。Kim 等人[60]研究了导电聚合物聚(3,4-亚乙基二氧噻吩)-聚(苯乙烯磺酸盐)(PEDOT:PSS)作为溶液处理有机太阳能电池(OPV)顶部电极的导电性和功函数。通过调节不同级 PEDOT:PSS (如 PH1000 和 AI4083)的混合比例, 可以改变电导率和功函数。PH1000 和 AI4083 混合物的体积比为 2:1, 提供了 443 S/cm 的电导率, 在 AM1.5G 光谱校准的 100 mW/cm² 照明下, 制造的全溶液处理 OPV 提供了 2.04% 的最佳光转换效率(PCE), Peh 等人[61]使用喷涂技术用于有机光伏制造。通过优化溶剂的润湿性、表面张力和沸点确保有机层的均匀涂覆。使得 PEDOT:PSS 悬浮液在疏水表面上的润湿性和干燥时间有所优化, 在不影响器件性能的情况下获得了喷涂透明阳极。进一步将这种无真空工艺应用于近红外吸收剂, 以获得透明度接近 60% 的透明有机太阳能电池, 使得基于对 P3HT:PCBM 的润湿性大幅度改善。通过喷涂获得相对均匀和薄的 AI4083 层。P3HT:PCBM 表面的 AI4083 层提高了水基 PH500 的润湿性。具有 PH500 阳极的 P3HT:PCBM 器件的 PCE 为 1.79%。部分其他方式处理 PEDOT:PSS 后的 OSCs 的光电转换效率见表 3。

Table 3. PCE of OSCs after PEDOT:PSS modified by other methods

表 3. 其他方式修饰 PEDOT:PSS 后 OSCs 的 PCE

Modification	Active layer	ETL	V _{OC} /V	J _{SC} (mA/cm ²)	FF	PCE/%	提升原理
水洗	PTB7-Th:PC ₇₁ BM	Al	0.65	25.86	0.762	16.7 [54]	改善形貌
GO	PTB7:PC ₇₁ BM	Al	0.62	13.0	/	4.13 [56]	改善形貌
Eu ³⁺	PTB7:PC ₇₁ BM	Al	0.618	15.1	0.425	3.97 [57]	电导率增加
PEG-TmDD	P3HT:ICBA	PEI	0.78	9.0	0.58	4.1 [58]	电导率增加
石墨烯	/	PE	0.68	6.8	0.602	2.87 [59]	理论计算

续表

不同比例	P3HT:ICBA	Al	0.567	6.91	0.512	2.04 [60]	电导率增加
润湿性	P3HT:PCBM	/	0.60	7.84	0.39	1.79 [61]	电导率增加

使用其他方式改善 OSCs 的性能的原理主要为改善形貌、提升导电率等，在基于水洗修饰方法处理 PEDOT:PSS 作为空穴传输层的 OSCs 其对于改善短路电流密度、填充因子、功率转换效率效果最佳。在基于 PEG-TmDD 修饰 PEDOT:PSS 作为空穴传输层的 OSCs 其对于改善短路开率电压效果最佳。

通过不同处理方式修饰 PEDOT:PSS 作为 OSCs 的空穴传输层可以得出，通过提升 PEDOT:PSS 的导电率、改善形貌增加活性层/空穴传输层的电荷传输能力在提高有机太阳能电池 PCE 方面取得了理想的效果，但还存在一些关键问题需要解决，首先要降低 PEDOT:PSS 的酸性，其次要扩大大规模生产的方式。

3. PEDOT:PSS 在柔性太阳能电池中的应用

2021 年, Hu 等人[62]将双(乙酰丙酮)二氧化钼(BADM)作为一种有效的掺杂剂引入到 PEDOT:PSS 中用于制备平面 PSCs。结果表明, 采用 BADM 对 PEDOT:PSS 进行修饰后, PCE 由 14.26%提高到 17.11%, 这主要是由于填充因子和短路电流密度的增加。不仅如此, BADM 的掺杂有利于增强钙钛矿在柔性基体中的延展性, 当轻微弯曲时, 几乎没有裂纹。2020 年, Castro 等人[63]在环境条件下, 在柔性无 ITO 基底上使用槽模涂布 P3HT:O-IDTBR (一种高聚物)的方法制备了有机太阳能电池, 并发现用异丙醇稀释 PEDOT:PSS 之后作为空穴传输层涂覆在活性层上时, 活性层的光学带隙发生了变化, 器件性能得到提高, 通过辊压加工在大面积制造方面更具优势, 这与 PEDOT:PSS 良好的力学柔性密不可分, 当使用 Ag 作为背电极时, 效率可以达到更高。

4. 总结与展望

本文主要综述了聚(3,4-乙烯二氧噻吩):聚苯乙烯磺酸盐(PEDOT:PSS)的各种改善方法和在有机太阳能电池(OSCs)空穴传输层中的应用研究最新进展, 有机太阳能电池作为一种新型的太阳能电池, 近年来得到飞速发展, PEDOT:PSS 作为 OSCs 传输层的 PCE 已达到 19%。PEDOT:PSS 是目前使用最广泛的有机空穴传输材料, 但由于 PEDOT:PSS 的酸性和吸湿性对电池的电极和稳定性不利, 从而束缚了其大规模生产和使用, 所以降低 PEDOT:PSS 吸湿性和腐蚀性很重要。目前有机空穴传输层的材料还存在很多不足, 但 PEDOT:PSS 作为有机空穴传输材料的修饰性有较高的灵活性, 这使得我们在更高性能的有机空穴层传输材料的研究和开发具有重要意义。

参考文献

- [1] Meng, L., Zhang, Y., Wan, X., *et al.* (2018) Organic and Solution-Processed Tandem Solar Cells with 17.3% Efficiency. *Science*, **361**, 1094-1098.
- [2] Jiang K., Wei Q., Lai J., *et al.* (2019) Alkyl Chain Tuning of Small Molecule Acceptors for Efficient Organic Solar Cells. *Joule*, **3**, 3020-3033. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.09.010>
- [3] Li, H., Xiao, Z., Ding, L., *et al.* (2018) Thermostable Single-Junction Organic Solar Cells with a Power Conversion Efficiency of 14.62%. *Science Bulletin*, **63**, 340-342. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2018.02.015>
- [4] Sun, H., Liu, T., Yu, J., *et al.* (2019) A Monothiophene Unit Incorporating Both Fluoro and Ester Substitution Enabling High-Performance Donor Polymers for Non-Fullerene Solar Cells with 16.4% Efficiency. *The Royal Society of Chemistry*, **12**, 3328-3337. <https://doi.org/10.1039/C9EE01890E>
- [5] Xiao, Z., Jia, X., Ding, L., *et al.* (2017) Ternary Organic Solar Cells Offer 14% Power Conversion Efficiency. *Science Bulletin*, **62**, 1562-1564. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2017.11.003>
- [6] Lu, S., Sun, Y., Ren, K., *et al.* (2017) Recent Development in ITO-Free Flexible Polymer Solar Cells. *Polymers*, **10**,

Article No. 5. <https://doi.org/10.3390/polym10010005>

- [7] Zhen, H., Wang, D., Yan, F., *et al.* (2018) Interfacial Engineering of Printable Bottom Back Metal Electrodes for Full-Solution Processed Flexible Organic Solar Cells. *Semicond*, **39**, Article No. 9. <https://doi.org/10.1088/1674-4926/39/1/014002>
- [8] Liu, K., Lu, S.D., Yue, S.Z., *et al.* (2016) Wrinkled Substrate and Indium Tin Oxide-Free Transparent Electrode Making Organic Solar Cells Thinner in Active Layer. *Power Sources*, **331**, 43-49. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.09.038>
- [9] Xiao, Z., Jia, X., Li, D., *et al.* (2017) $26 \text{ mAcm}^{-2} J_{\text{sc}}$ from Organic Solar Cells with a Low-Bandgap Non-Fullerene Acceptor. *Science Bulletin*, **62**, 1494-1496. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2017.10.017>
- [10] Antohe, S., Tugulea, L., *et al.* (2010) Electrical and Photovoltaic Properties of a Two-Layer Organic Photovoltaic Cell. *Physica Status Solidi*, **128**, 253-260. <https://doi.org/10.1002/pssa.2211280128>
- [11] Salim, M.B., Nekovei, R., Jeyakumar, R., *et al.* (2020) Organic Tandem Solar Cells with 18.6% Efficiency. *Solar Energy*, **198**, 160-166. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.01.042>
- [12] Krebs, F.C., Espinosa, N., Hosel, M., *et al.* (2014) 25th Anniversary Article: Rise to Power-OPV-Based Solar Parks. *Advanced Materials*, **26**, 29-39. <https://doi.org/10.1002/adma.201302031>
- [13] Yuan, J., Zhang, Y., Zhou, L., *et al.* (2019) Single-Junction Organic Solar Cell with over 15% Efficiency Using Fused-Ring Acceptor with Electron-Deficient Core. *Joule*, **3**, 1140-1151. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.01.004>
- [14] Xiong, J., Jin, K., Jiang, Y.F., *et al.* (2019) Thiolactone Copolymer Donor Gifts Organic Solar Cells a 16.72% Efficiency. *Science Bulletin*, **64**, 1573-1576. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2019.10.002>
- [15] Liu, J., Liu, L., Zuo, C., *et al.* (2019) 5h-Dithieno[3,2-B:20,30-D]Pyran-5-One Unit Yields Efficient Wide-Bandgap Polymer Donors. *Science Bulletin*, **64**, 1655-1657. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2019.09.001>
- [16] Wang, T., Qin, J., Xiao, Z., *et al.* (2020) A 2.16 eV Bandgap Polymer Donor Gives 16% Power Conversion Efficiency. *Science Bulletin*, **65**, 179-181. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2019.11.030>
- [17] Yin, Z., Wei, J., Zheng, Q., *et al.* (2016) Interfacial Materials for Organic Solar Cells: Recent Advances and Perspectives. *Advanced Science*, **3**, Article ID: 1500362. <https://doi.org/10.1002/adv.201500362>
- [18] Sun, Y., Takacs, C.J., Cowan, S.R., *et al.* (2011) Efficient, Air-Stable Bulk Heterojunction Polymer Solar Cells Using MoO_x as the Anode Interfacial Layer. *Advanced Materials*, **23**, 2226-2230. <https://doi.org/10.1002/adma.201100038>
- [19] Hu, L.J., Li, M., Yang, K., *et al.* (2018) PEDOT:PSS Monolayers to Enhance the Hole Extraction and Stability of Perovskite Solar Cells. *Journal of Materials Chemistry*, **6**, 16583-16589. <https://doi.org/10.1039/C8TA05234D>
- [20] Wang, C., Sun, K., Fu, J., *et al.* (2018) Enhancement of Conductivity and Thermoelectric Property of PEDOT:PSS via Acid Doping and Single Post-Treatment for Flexible Power Generator. *Advanced Sustainable Systems*, **2**, Article ID: 1800085. <https://doi.org/10.1002/adsu.201800085>
- [21] Skraba, P., Bratina, G., Igarashi, S., *et al.* (2011) In Diffusion and Electronic Energy Structure in Polymer Layers on in Tin Oxide. *Thin Solid Films*, **519**, 4216-4219. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2011.02.034>
- [22] Xia, Y., Sun, K., Ouyang, J., *et al.* (2012) Solution-Processed Metallic Conducting Polymer Films as Transparent Electrode of Optoelectronic Devices. *Advanced Materials*, **24**, 2436-2440. <https://doi.org/10.1002/adma.201104795>
- [23] Chung, J., Park, S.M., Chang, S.O., *et al.* (2014) A Novel Mutation of TMPRSS3 Related to Milder Auditory Phenotype in Korean Postlingual Deafness: A Possible Future Implication for a Personalized Auditory Rehabilitation. *Journal of Molecular Medicine*, **92**, 651-663. <https://doi.org/10.1007/s00109-014-1128-3>
- [24] Fan, X., Xu, B., Liu, S., *et al.* (2016) Transfer-Printed PEDOT:PSS Electrodes Using Mild Acids for High Conductivity and Improved Stability with Application to Flexible Organic Solar Cells. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **8**, 14029-14036. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b01389>
- [25] Ouyang, J., Xu, Q.F., Chu, C.W., *et al.* (2004) On the Mechanism of Conductivity Enhancement in Poly(3,4-Ethylenedioxythiophene):Poly(Styrene Sulfonate) Film through Solvent Treatment. *Polymer*, **45**, 8443-8450. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2004.10.001>
- [26] Kang, Q., Liao, Q., Yang, C.Y., *et al.* (2022) A New PEDOT Derivative for Efficient Organic Solar Cell with a Fill Factor of 0.80. *Advanced Energy Materials*, **12**, Article ID: 2103892. <https://doi.org/10.1002/aenm.202103892>
- [27] Hong, N.L., Xiao, J.Y., Li, Y.D., *et al.* (2016) Unexpected Fluorescent Emission of Graft Sulfonated-Acetone-Formaldehyde Lignin and Its Application as a Dopant of Pedot for High Performance Photovoltaic and Light-Emitting Devices. *Journal of Materials Chemistry C*, **4**, 5297-5306. <https://doi.org/10.1039/C6TC01170E>
- [28] Yagci, O., *et al.* (2016) Effect of Boric Acid Doped PEDOT:PSS Layer on the Performance of P3[30]HT:PCBM Based Organic Solar Cells. *Synthetic Metals*, **212**, 12-18. <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2015.11.010>

- [29] Liu, L., Li, F.F., Zhao, C.J., *et al.* (2019) Performance Enhancement of Conventional Polymer Solar Cells with TTF-Py-Modified PEDOT:PSS Film as the Hole Transport Layer. *ACS Applied Energy Materials*, **2**, 6577-6583. <https://doi.org/10.1021/acsaeem.9b01125>
- [30] Toshima, N., Ichikawa, S., *et al.* (2015) Conducting Polymers and Their Hybrids as Organic Thermoelectric Materials. *Journal of Electronic Materials*, **44**, 384-390. <https://doi.org/10.1007/s11664-014-3312-1>
- [31] Zhu, Z., Song, H., Xu, J., *et al.* (2015) Significant Conductivity Enhancement of PEDOT:PSS Films Treated with Lithium Salt Solutions. *Journal of Materials Science Materials in Electronics*, **26**, 429-434. <https://doi.org/10.1007/s10854-014-2417-x>
- [32] Huang, D., Goh, T., Kong, J., *et al.* (2017) Perovskite Solar Cells with a DMSO-Treated PEDOT:PSS Hole Transport Layer Exhibit Higher Photovoltaic Performance and Enhanced Durability. *Nanoscale*, **9**, 4236-4243. <https://doi.org/10.1039/C6NR08375G>
- [33] Kim, G.H., Shao, L., Zhang, K., *et al.* (2013) Engineered Doping of Organic Semiconductors for Enhanced Thermoelectric Efficiency. *Nature Materials*, **12**, 719-723. <https://doi.org/10.1038/nmat3635>
- [34] Timpanaro, S., Kemerink, M., Touwslager, F.J., *et al.* (2004) Morphology and Conductivity of PEDOT/PSS Films Studied by Scanning-Tunneling Microscopy. *Chemical Physics Letters*, **394**, 339-343. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2004.07.035>
- [35] Yu, Z., Xia, Y., Du, D., *et al.* (2016) PEDOT:PSS Films with Metallic Conductivity through a Treatment with Common Organic Solutions of Organic Salts and Their Application as a Transparent Electrode of Polymer Solar Cells. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **8**, 11629-11638. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b00317>
- [36] Seung, H.E. (2009) Polymer Solar Cells Based on Inkjet-Printed PEDOT:PSS Layer. *Organic Electronics*, **10**, 536-542. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2009.01.015>
- [37] Kang, Y.J., Kim, C.S., Kim, D.G., *et al.* (2012) Fully Spray-Coated Inverted Organic Solar Cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **103**, 76-79. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2012.04.027>
- [38] Hu, Z., Zhang, J., Hao, Z., *et al.* (2011) Influence of Doped PEDOT:PSS on the Performance of Polymer Solar Cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **95**, 2763-2767. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.04.040>
- [39] Peng, B., Guo, X., Cui, C., *et al.* (2011) Performance Improvement of Polymer Solar Cells by Using a Solvent-Treated Poly(3,4-Ethylenedioxythiophene):Poly(Styrenesulfonate) Buffer Layer. *Applied Physics Letters*, **98**, Article ID: 243308. <https://doi.org/10.1063/1.3600665>
- [40] Xia, Y., Ouyang, J., *et al.* (2012) Significant Different Conductivities of the Two Grades of Poly(3,4-Ethylenedioxythiophene):Poly(Styrenesulfonate), Clevis P and Clevis PH10007 Arising from Different Molecular Weights. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **4**, 4131-4140. <https://doi.org/10.1021/am300881m>
- [41] Fernandez-Arteaga, Y., Maldonado, J.L., Nicasio-Collazo, J., *et al.* (2021) Solution Processable Graphene Derivative Used in a Bilayer Anode with Conductive PEDOT:PSS on the Non-Fullerene PBDB-T:ITIC Based Organic Solar Cells. *Solar Energy*, **225**, 656-665. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.07.049>
- [42] Hong J., Min, S., *et al.* (2020) Highly Conductive PEDOT:PSS Electrode Obtained via Post-Treatment with Alcoholic Solvent for ITO-Free Organic Solar Cells. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, **86**, 205-210. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2020.03.005>
- [43] Saghaei, J., Fallahzadeh, A., Saghaei, T., *et al.* (2015) ITO-Free Organic Solar Cells Using Highly Conductive Phenol-Treated PEDOT:PSS Anodes. *Organic Electronics*, **24**, 188-194. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2015.06.002>
- [44] Li, W.P., Zhang, X.L., Zhang, X., *et al.* (2017) High-Performance Solution-Processed Single-Junction Polymer Solar Cell Achievable by Post-Treatment of PEDOT:PSS Layer with Water-Containing Methanol. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **9**, 1446-1452. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b12389>
- [45] Zhang, X.L., Jiang, Q.Q., Wang, J.X., *et al.* (2020) Black Phosphorous Quantum Dots as an Effective Interlayer Modifier in Polymer Solar Cells. *Solar Energy*, **206**, 670-676. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.06.007>
- [46] Xie, Z., Xu, R., Chen, J., *et al.* (2019) The Modified PEDOT:PSS as Cathode Interfacial Layer for Scalable Organic Solar Cells. *North-Holland*, **71**, 143-149. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2019.05.012>
- [47] Cheng, W.W., Nian, *et al.* (2020) Boost the Performance of Inverted Perovskite Solar Cells with PEDOT:PSS/Graphene Quantum Dots Composite Hole Transporting Layer. *Organic Electronics*, **78**, Article ID: 105575. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2019.105575>
- [48] Nguyen, D.C.T., Kim, B., Geun, H., *et al.* (2023) Incorporation of Carbon Quantum Dots with PEDOT:PSS for High-Performance Inverted Organic Solar Cells. *Synthetic Metals*, **298**, Article ID: 117430. <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2023.117430>
- [49] Wang, G., Zhang, M., Li, Z., *et al.* (2023) Efficient and Stable Organic Solar Cells Enabled by Incorporation of Titanium Dioxide Doped PEDOT:PSS as Hole Transport Layer. *Progress in Organic Coatings*, **183**, Article ID: 107819.

- <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.107819>
- [50] Wang, Y., Li, N., Cui, M., *et al.* (2021) High-Performance Hole Transport Layer Based on WS₂ Doped PEDOT:PSS for Organic Solar Cells. *Organic Electronics*, **99**, Article ID: 106305. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2021.106305>
- [51] Zheng, Z., Hu, Q., Zhang, S.Q., *et al.* (2018) A Highly Efficient Non-Fullerene Organic Solar Cell with a Fill Factor over 0.80 Enabled by Aine-Tuned Hole-Transporting Layer. *Advanced Materials*, **30**, Article ID: 1801801. <https://doi.org/10.1002/adma.201801801>
- [52] Kim, S.H., Park, B.M., Kim, G.P., *et al.* (2014) Annealing Effects of Au Nanoparticles Embedded PEDOT:PSS in Bulk Heterojunction Organic Solar Cells. *Synthetic Metals*, **192**, 101-105. <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2014.03.019>
- [53] Nazim, M., Sadia, A., Shaheer, A.M., *et al.* (2018) D- π -A- π -D Type Thiazolo[5,4-D]Thiazole-Core Organic Chromophore and Graphene Modified PEDOT:PSS Buffer Layer for Efficient Bulk Heterojunction Organic Solar Cells. *Solar Energy*, **171**, 366-373. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.06.087>
- [54] Li, Q., Sun, Y., Yang, C., *et al.* (2020) Optimizing the Component Ratio of PEDOT:PSS by Water Rinse for High Efficiency Organic Solar Cells over 16.7%. *Science Bulletin*, **65**, 747-752. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2019.12.021>
- [55] Nguyen, D.C.T., *et al.* (2021) Use of Modified PEDOT:PSS/Graphene Oxide Dispersions as a Hole Transport Layer for Inverted Bulk-Heterojunction Organic Solar Cells. *Organic Electronics*, **100**, Article ID: 106388. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2021.106388>
- [56] Mohammad, T., Bharti, V., Kumar, V., *et al.* (2019) Spray Coated Europium Doped PEDOT:PSS Anode Buffer Layer for Organic Solar Cell: The Role of Electric Field during Deposition. *Organic Electronics*, **66**, 242-248. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2018.12.034>
- [57] Li, Z., Meng, W., Tong, J., *et al.* (2015) A Nonionic Surfactant Simultaneously Enhancing Wetting Property and Electrical Conductivity of PEDOT:PSS for Vacuum-Free Organic Solar Cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **137**, 311-318. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.02.024>
- [58] Jdigoras, J., Guillen, E., Ramos, F.J., *et al.* (2014) Highly Efficient Flexible Cathodes for Dye Sensitized Solar Cells to Complement Pt@ TCO Coatings. *Journal of Materials Chemistry A*, **2**, 3175-3181. <https://doi.org/10.1039/c3ta13524a>
- [59] Singh, T.J., Singh, S., Islam, S.M., *et al.* (2019) Flexible Organic Solar Cells with Graphene/PEDOT:PSS Schottky Junction on PET Substrates. *Optik*, **181**, 984-992. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.12.179>
- [60] Kim, D.H., Lee, D.J., Kim, B., *et al.* (2020) Tailoring PEDOT:PSS Polymer Electrode for Solution-Processed Inverted Organic Solar Cells. *Solid-State Electronics*, **169**, Article ID: 107808. <https://doi.org/10.1016/j.sse.2020.107808>
- [61] Peh, R.J., Lu, Y., Zhao, F., *et al.* (2011) Vacuum-Free Processed Transparent Inverted Organic Solar Cells with Spray-Coated PEDOT:PSS Anode. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, **95**, 3579-3584. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.09.018>
- [62] Hu, Y.C., Tang, Y., Zhang, Z.H., *et al.* (2022) Improving the Efficiency of Inverted Perovskite Solar Cells by Bis(Acetylacetonato) Dioxomolybdenum(VI)-Doped PEDOT:PSS. *Materials Letters*, **306**, Article ID: 130911. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.130911>
- [63] Marcial, F., Mazzolini, E., Sondergaard, R.R., *et al.* (2020) Flexible ITO-Free Roll-Processed Large-Area Nonfullerene Organic Solar Cells Based on P3HT:O-IDTBR. *Journal of Engineering*, **14**, Article ID: 034067.